










## Process for joining intermetallic materials by reaction sintering and derived applications

**Patent number:** EP0767028  
**Publication date:** 1997-04-09  
**Inventor:** BIGAY YVES (FR); LASALMONIE ALAIN (FR)  
**Applicant:** COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE (FR); SNECMA (FR)  
**Classification:**  
- **International:** B23K35/00; B23K20/16; B23K35/32  
- **European:** B23K20/16, B23K35/00B4, B23K35/00B6, B23K35/02  
**Application number:** EP19960402107 19961003  
**Priority number(s):** FR19950011650 19951004

### Also published as:

 US5788142 (A1)  
 JP9164490 (A)  
 FR2739583 (A1)  
 EP0767028 (B1)

### Cited documents:

 US3716347  
 GB955675  
 US5318214  
 US3335002  
 EP0650798  
more >>

### Abstract of EP0767028

Two pieces of intermetallic compound such as TiAl are bonded together, or one such piece is coated or repaired, by mixing the corresponding metal powders to approximately the same formula as in said piece (s) and compacting an intermediate or coating section from the mixture, then placing the section between or in contact with the piece(s) and heating the assembly to reactively sinter the section and bond it to the piece(s) by diffusion. Pref. the heating involves a first sintering stage followed by bonding at a higher temp.

---

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

97 EP 0 767 028 B 1

10 DE 696 06 001 T 2

51 Int. Cl.7:  
B 23 K 35/00  
B 23 K 20/16

- 21 Deutsches Aktenzeichen: 696 06 001.9  
96 Europäisches Aktenzeichen: 96 402 107.5  
96 Europäischer Anmeldetag: 3. 10. 1996  
97 Erstveröffentlichung durch das EPA: 9. 4. 1997  
97 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: 5. 1. 2000  
47 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 8. 6. 2000

30 Unionspriorität:  
9511650 04. 10. 1995 FR

73 Patentinhaber:  
Commissariat à l'Energie Atomique, Paris, FR

74 Vertreter:  
Mitscherlich & Partner, Patent- und Rechtsanwälte,  
80331 München

84 Benannte Vertragsstaaten:  
AT, CH, DE, ES, FR, GB, IT, LI, NL, SE

72 Erfinder:  
Bigay, Yves, 91370 Verrieres le Buisson, FR;  
Lasalmonie, Alain, 94240 L'Hay les Roses, FR

54 Verfahren zum Verbinden von intermetallischen Material durch Reaktionssinterung und abgeleitete Anwendungen

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 696 06 001 T 2



Diese Erfindung betrifft ein Verfahren zum Aneinanderfügen und Verbinden von Werkstücken aus intermetallischem Material durch Reaktionssintern. Sie betrifft ebenfalls bestimmte abgeleitete Anwendungen mit einer Beschichtung oder zur Ausführung einer Reparatur.

Es wurden verschiedenste intermetallische Materialien mit interessanten Eigenschaften entwickelt, die bei der Verwendung in bestimmten besonderen Anwendungen, insbesondere auf dem Gebiet der Flugtechnik, gegenüber den klassischen Metallegierungen oder Superlegierungen Vorteile bieten. Unter diesen Zusammensetzungen befinden sich insbesondere TiAl, TiNi, Ni-Al, FeAl und Ti<sub>3</sub>Al. Diese Stoffe wurden durch Gießereitechnik oder Schmiedetechnik geformt. In US 4 294 615 beispielsweise ist ein Werkstoff TiAl dieses Typs beschrieben.

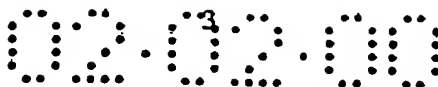
Das Verbinden der hergestellten Werkstücke bietet jedoch besondere Schwierigkeiten, die nur ungenügend gelöst worden sind. Die bekannten Verbindungstechniken, die bei den klassischen Werkstoffen, Metallegierungen oder Superlegierungen, angewendet werden, erweisen sich als schlecht geeignet für diese neuen intermetallischen Materialien. Insbesondere haben die Verbindungsverfahren durch Schmelzen, mit oder ohne Aufschweißmetall, durch Schweißen mit Energiestrahle, Elektronenstrahl oder Laserstrahl oder durch Lichtbogenschweißen im WIG-Schweißverfahren den Nachteil, daß sie die metallurgische Struktur des Materials tiefgreifend verändern und daher besonders problematisch in der Anwendung mit spröden Materialien wie den intermetallischen Verbindungen sind. Desgleichen beim Verbinden mit Lötverfahren und Diffusionslötverfahren, wobei der Schmelzpunkt des Auftragsmetalls unter dem des Basismetalls liegt, so daß die metallurgische Kontinuität der Verbindung nicht gewährleistet werden kann und deren Verwendungsbereich daher besonders in Bezug auf Temperaturen einschränkt. Bei manchen anderen Verfahren wie dem Diffusionsschweißen und dem Reibschweißen wird die Verbindung in festem Zustand hergestellt. Das Diffusionsschweißen erfordert jedoch Koppelflächen von perfekter geometrischer Qualität und unterliegt einer sehr strengen Einhaltung der Bedingungen hinsichtlich Sauberkeit und Temperatur-Zeit-Folge. Das Reibschweißen erfordert besondere rheologische Qualitäten und eignet sich schlecht für manche Konfigurationen des Verbindens.

In der Schrift JP-A-4 037 658 ist ein Verfahren zum Verbinden von zwei Elementen beschrieben, von denen mindestens eins aus einem intermetallischen Material besteht, mit den folgenden Verfahrensschritten:

- Vermischen von Elementarpulvern,
- Anordnen eines Zwischenelements, das aus den Elementarpulvern hergestellt wurde, zwischen den Oberflächen der zu verbindenden Elemente,
- Behandlung der hergestellten Gesamtanordnung im Ofen, um ein Sintern des Zwischenelements und eine Verfestigung der Verbindung zu erreichen.

Ein Ziel der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Verbinden von Werkstücken aus intermetallischem Material zu schaffen, das die Nachteile der bekannten Verfahren des bisherigen Standes nicht aufweist und das einen ausreichenden Qualitätsstandard gewährleistet, wie er insbesondere auf dem Gebiet der Flugtechnik erforderlich ist. Ein Verfahren zum Verbinden von zwei Elementen, von denen mindestens eins aus einem intermetallischen Material besteht, das diese Bedingungen erfüllt, ist dadurch gekennzeichnet, daß es die folgenden Verfahrensschritte aufweist:

- a) Vermischen von Elementarpulvern zur Herstellung einer Gesamtzusammensetzung, die derjenigen einer intermetallischen Verbindung der gleichen Art wie das genannte intermetallische Material entspricht,
- b) Verdichtung und Formung eines Zwischenelements aus dem in Schritt a) hergestellten Gemisch bei einer niedrigeren Temperatur als der Reaktionssinterungstemperatur der Verbindung,
- c) Anordnen dieses Zwischenelements zwischen den Oberflächen der zu verbindenden Elemente,
- d) Bearbeitung der in Schritt c) hergestellten Gesamtanordnung im Ofen in einem ersten Wärmebehandlungszyklus, dessen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Druck und Zeitdauer dergestalt bestimmt sind, daß eine Reaktionssinterung des Zwischenelements und eine Verfestigung der Verbindung erzielt wird,
- e) Diffusionsbehandlung im Ofen in einem zweiten Wärmebehandlungszyklus bei einer höheren Temperatur als in Schritt d) und unter Bedingungen, die so festgelegt wurden, daß die Verbindung mechanisch verfestigt wird.



Die Verwendung des in den Verfahrensschritten a und b hergestellten Zwischenelements als Auftragsmaterial in dem Verfahrensschritt c dieser Erfindung bietet zahlreiche Vorteile, dabei insbesondere folgende:

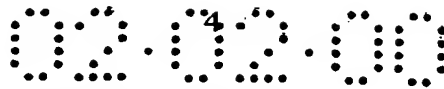
- die durchschnittliche Zusammensetzung des Auftragsmaterials kann identisch mit der des Basismaterials sein oder kann an die Gesamtanforderungen für die Verwendung der Verbindung angepaßt werden,
- das Auftragsmaterial weist in der erfindungsgemäß vorgesehenen Form eine Anfangsduktilität auf, die es erlaubt, ungenaues Aneinanderliegen und ungenaue Vorbereitung der Verbindungsflächen auszugleichen,
- in Schritt d des erfindungsgemäßen Verfahrens wird durch die Reaktionssinterung der Elementarpulver das Auftragsmaterial in eine intermetallische Verbindung umgewandelt, die vorteilhafterweise identisch mit der des zu verbindenden Materials sein kann oder an die besonderen Anforderungen für die Verwendung der Verbindung angepaßt werden kann,
- in Schritt e des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine metallurgische Verbindung von angemessener Qualität durch Diffusion unter Druck erzielt.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung gehen näher aus der folgenden Beschreibung einiger Anwendungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verbindungsverfahrens hervor.

Eine erste bemerkenswerte Sequenz des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Verbinden von zwei Elementen, von denen mindestens eins aus einem intermetallischen Material besteht, ermöglicht die Herstellung eines Auftragsmaterials und umfaßt die beiden folgenden Verfahrensschritte:

- a) Vermischen von Elementarpulvern zur Herstellung einer Gesamtzusammensetzung, die derjenigen einer intermetallischen Verbindung der gleichen Art wie das genannte, zu verbindende intermetallische Material entspricht,
- b) Verdichtung und Formung eines Zwischenelements aus dem in Schritt a) hergestellten Gemisch.

Dieses Zwischenelement kann insbesondere hergestellt werden, indem gewalzte Bänder oder Bleche durch Strangpressen und/oder Walzen in der gewünschten Stärke bei einer niedrigen Temperatur hergestellt werden, die unter der Reaktionssinterungstemperatur der Verbindung liegt. Es kann auch ein direktes Verdichten an den gewünschten Seiten ausgeführt werden,

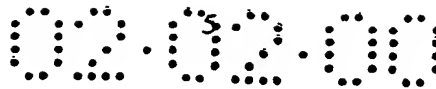


oder auf das Verdichten kann auch eine Bearbeitung folgen. Nach diesem Formen werden die endgültigen geometrischen Maße des Zwischenelements durch ein beliebiges herkömmliches Mittel wie z. B. Schneiden, Tiefziehen usw. hergestellt. Die Herstellung des Gemischs und die Herstellung des Auftragsmaterials aus Elementarpulvern, wie oben beschrieben, kann mit jedem bekannten physikalisch-chemischen Verfahren wie mechanisches Mischen, Zerstäuben, Kopräzipitation von Pulver usw. erfolgen.

Im nächsten Verfahrensschritt c, bei dem dieses Zwischenelement zwischen den Oberflächen der zu verbindenden Elemente angeordnet wird, kann die Verbindung hergestellt werden. Dabei wird das Auftragsmaterial eingefüllt oder direkt zwischen den beiden zu verbindenden Teilen aufgetragen. Die Gesamtanordnung kann bei Umgebungstemperatur oder bei einer Temperatur, die unter der Auslösetemperatur der Reaktionssinterung liegt, gepreßt werden, um ein angemessenes Aneinanderliegen zu gewährleisten. Die Duktilität des Auftragsmaterials bringt eine ausreichende Verformungsfähigkeit mit sich, um ungenaues Aneinanderliegen auszugleichen.

Im nächsten Verfahrensschritt d wird die in Schritt c hergestellte Gesamtanordnung in den Ofen gebracht und in einem ersten Wärmebehandlungszyklus, dessen Bedingungen hinsichtlich der Temperatur, des Drucks, der ein isostatischer oder einachsiger Druck sein kann, und hinsichtlich der Zeitdauer dergestalt bestimmt sind, daß die Umwandlung des Pulvergemischs in eine intermetallische Verbindung durch Reaktionssinterung durchgeführt wird. Je nach Art des intermetallischen Materials kann die Reaktionssinterung ohne Schmelzen erfolgen. Aus diesem Verfahrensschritt geht eine vollkommen intermetallische Verbindung hervor, die ausreichend verfestigt ist, um die Handhabung bei den folgenden Verfahrensschritten zu erleichtern.

Ein abschließender Verfahrensschritt e umfaßt eine Diffusionsbehandlung in einem zweiten Wärmebehandlungszyklus im Ofen, bei dem die im vorhergehenden Schritt d hergestellte Verbindung mit oder ohne Druck auf eine höhere Temperatur gebracht wird als in Schritt d, um die Diffusion zwischen der Zwischenschicht und den Basismetallen, aus denen die Gesamtverbindung besteht, dergestalt fortzusetzen, daß die Verbindung mechanisch verfestigt wird. Vorteilhafterweise erfolgt die Diffusionsbehandlung bei einer Temperatur, die höher ist als  $0,8 T_f$  wobei  $T_f$  die absolute Schmelztemperatur der verwendeten intermetallischen Verbindung ist. Bei der Anwendung des Verfahrens in der industriellen Produktion können die soeben



beschriebenen Verfahrensschritte und insbesondere die Schritte d und e der Behandlung im Ofen in kontinuierlicher Aufeinanderfolge durchgeführt oder getrennt werden, was Flexibilität schafft.

Im folgenden werden Anwendungsbeispiele beschrieben.

Als Beispiel 1 soll eine Verbindung zwischen zwei Werkstücken aus TiAl hergestellt werden. Das Zwischenelement aus Auftragsmaterial wird hergestellt, wie folgt:

a) Abwiegen der Elementarpulver in folgenden Proportionen:

Titan 631 g, Aluminium 341 g, Chrom 27,4 g.

und Vermischen in einem Verwirbler für die Dauer von 1 Stunde,

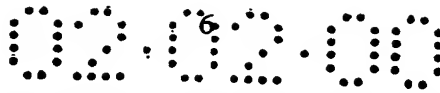
b) die Verdichtung wird durch Zusammenpressen des Gemischs in einer Achsrichtung unter einem Druck von  $7 \times 10^2$  MPa dergestalt erzielt, daß Platten mit 2 mm Stärke entstehen.

Im nächsten Verfahrensschritt c werden die zu verbindenden Werkstücke aus TiAl durch Bearbeitung und eine nachfolgende Reinigung vorbereitet, und das in Schritt b hergestellte Zwischenelement wird zwischen die beiden zu verbindenden Teile aus TiAl eingeschoben. Das so erzielte Ganze wird in einer Umhüllung aus weichem Stahl angeordnet, in der ein Vakuum hergestellt wird, und dann wird ein dichter Verschluß hergestellt. Zwischen der Umhüllung und den zu verbindenden Teilen wird ein sehr geringes Spiel gelassen, das weniger als 0,5 % beträgt.

Die Schritte d und e der Behandlung im Ofen erfolgen nach dem folgenden Zyklus und drucklos in direkter Abfolge:

- Erhitzen bis auf 600 °C und Halten dieser Temperatur während einer Stunde, um die Reaktionssinterung durchzuführen,
- sodann Erhitzen bis auf 1200 °C und Halten dieser Temperatur während drei Stunden, um die Diffusion zu bewirken und die Verfestigung zu steigern.

Das Ganze wird sodann enthüllt.



In Beispiel 2 handelt es sich um eine Variante der Herstellung einer Verbindung zwischen zwei Werkstücken aus TiAl. Das Zwischenelement aus Auftragsmaterial wird hergestellt, wie folgt:

a) Abwiegen der Elementarpulver in folgenden Proportionen:

Titan 631 g, Aluminium 341 g, Chrom 27,4 g.

und Vermischen in einem Verwirbler für die Dauer von 1 Stunde,

b) die Verdichtung und Formung auf folgende Weise erfolgt:

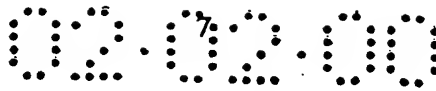
- isostatischen Pressen des in Schritt a hergestellten Gemischs in einer Latexhülle dergestalt, daß ein Preßbarren mit 50 mm Durchmesser und 120 mm Höhe erzielt wird,
- Einhüllen des hergestellten Pulverpreßlings in Aluminium mit einer Dicke von 10 mm, wodurch dieser Pulverpreßling während der nachfolgenden Umwandlungsvorgänge vor Oxidieren geschützt wird,
- Strangpressen bei 350 °C mit einer Preßform von 35 x 9 mm, wobei das Preßverhältnis 14 beträgt,
- Walzen bei 350 °C dergestalt, daß ein gewalztes Teil mit 0,5 mm Dicke entsteht, dessen durchschnittliche Zusammensetzung der des intermetallischen Werkstoffs  $\text{Ti}_{50}\text{Al}_{48}\text{Cr}_2$  entspricht,
- Entfernen der Aluminiumhülle durch Scherschneiden.

Im nächsten Verfahrensschritt c werden die zu verbindenden Werkstücke aus TiAl durch Bearbeitung und eine nachfolgende Reinigung vorbereitet, und das in Schritt b hergestellte Zwischenelement wird zwischen die beiden zu verbindenden Teile aus TiAl eingeschoben. Das so erzielte Ganze wird in einer Umhüllung aus Titan angeordnet, in der ein Vakuum hergestellt wird, und dann wird ein dichter Verschluß hergestellt. Die Schritte d und e erfolgen in direkter Abfolge in einem Raum mit heißisostatischem Druck nach dem folgenden Zyklus:

- Erhitzen bis auf 600 °C und Halten dieser Temperatur während einer Stunde unter einem Druck von  $10^2$  MPa, um die Reaktionssinterung durchzuführen,
- sodann Erhitzen bis auf 1200 °C und Halten dieser Temperatur während drei Stunden unter einem Druck von  $1,5 \times 10^2$  MPa, um die Diffusion zu bewirken und die Verfestigung zu steigern.

Das Ganze wird sodann enthüllt.





In Beispiel 3 wurden gegenüber dem Beispiel 2 nur folgende Modifikationen vorgenommen:

- in Schritt b der hergestellte Preßbarren unmittelbar einem Walzvorgang bei 20 °C unterzogen wird, um eine Dicke des TiAl von 1 mm zu erzielen,
- in Schritt c die Gesamtanordnung in ein Werkzeug zum einaxialen Warmpressen gebracht wird,
- die Schritte d und e in einer einzigen Behandlung zusammengefaßt werden, die in einem Ofen zum einaxialen Warmpressen gemäß dem folgenden Zyklus erfolgt:
- Erhitzen bis auf 1000 °C und Halten dieser Temperatur während zwei Stunden unter einem Druck von 50 MPa, um die Reaktionssinterung und die Diffusion durchzuführen.

Die Herstellung der Verbindung von Werkstücken aus TiAl kann gemäß den Modalitäten, die unter Bezugnahme auf die obigen Beispiele 1, 2 und 3 beschrieben wurden, in verschiedenen Ausführungsvarianten erfolgen.

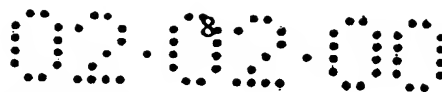
Insbesondere können bei dem Mischen der Pulver in Schritt a zahlreiche Einstellungen der Zusammensetzung des Auftragsmaterials vorgenommen werden, die an die Verwendungsanforderungen der Verbindung angepaßt sind, und wurden zum Beispiel die folgende Zusammensetzungen getestet:



wobei die angegebenen Anteile Atomanteile darstellen.

Ferner können die in den obigen Beispielen beschriebenen Verfahrensschritte in verschiedenen Kombinationen ausgeführt werden, was einerseits die Herstellung des Auftragsmaterials in den Schritten a und b und andererseits die Herstellung der Verbindung in den Schritten c, d und e betrifft, und insbesondere:

- kann das Zwischenelement von Beispiel 1 mit den Bedingungen des Verbindens der Beispiele 2 und 3 bzw. mit den Bedingungen des Verbindens der Beispiele 1 oder 3 und 1 oder 2 verwendet werden.



In Beispiel 4 handelt es sich um eine Verbindung von zwei Werkstücken aus NiAl

Die Anwendungsbedingungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind identisch mit den oben unter Bezugnahme auf das Beispiel 2 beschriebenen, mit Ausnahme der folgenden Modifikationen:

- die Proportionen der Elementarpulver für die Herstellung des Zwischenelements aus Auftragsmaterial lauten: Nickel 685 g und Aluminium 314 g
- die in Schritt c verwendete Hülle besteht aus Stahl.

Bei dieser Verbindung können die Ausführungsvarianten, die zuvor für die Verbindung von Werkstücken aus TiAl unter Bezugnahme auf die obenstehenden Beispiele 1 und 3 beschrieben wurden, ebenfalls einerseits zur Herstellung des Auftragsmaterials und andererseits zur Durchführung der Reaktionssinterung und der Verfestigung durch Diffusion angewendet werden.

In Beispiel 5 handelt es sich um eine Verbindung von zwei Werkstücken aus TiNi.

Die Anwendungsbedingungen sind identisch mit den oben unter Bezugnahme auf das Beispiel 4 beschriebenen, und es können die gleichen Ausführungsvarianten angewendet werden, mit Ausnahme der folgenden Modifikation:

- die Proportionen der Elementarpulver für die Herstellung des Auftragsmetalls lauten: Nickel 551 g, Titan 449 g.

In Beispiel 6 handelt es sich um eine Verbindung von zwei Werkstücken aus FeAl.

Es können wieder Anwendungsbedingungen, die mit denen der Beispiele 4 und 5 identisch sind, und deren Ausführungsvarianten verwendet werden, mit Ausnahme der folgenden Modifikationen:

- die Proportionen der Elementarpulver lauten: Fe 674 g, Aluminium 326 g,

- die Erwärmungstemperaturen für die zwei Erwärmungsstufen betragen 600 °C bzw. 1100 °C.

In Beispiel 7 handelt es sich um eine Verbindung von zwei Werkstücken aus  $Ti_3Al$ .

Es gelten wieder die Anwendungsbedingungen der Beispiele 4, 5 und 6, und ihre Ausführungsvarianten können verwendet werden, mit Ausnahme der folgenden Modifikationen:

- die Proportionen der Elementarpulver lauten: Titan 842 g, Aluminium 158 g,
- die Erwärmungstemperaturen für die zwei Erwärmungsstufen betragen 600 °C bzw. 1000 °C.

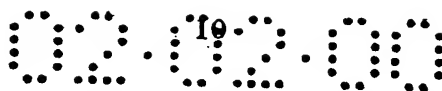
Mit dem erfindungsgemäßen Verbindungsverfahren können auch zwei Elemente aus anderen intermetallischen Stoffen als denen, die in den oben beschriebenen Ausführungsbeispielen beschrieben wurden, miteinander verbunden werden, insbesondere z. B. die auf Niobiumbasis.

In Beispiel 8 handelt es sich um eine heterogene Verbindung zwischen einem Element aus intermetallischem Material und einem Element aus einer Metallegierung.

In diesem Beispiel werden ein Element aus  $TiAl$  und ein Element aus einer Titanlegierung, z. B. TA6V, unter identischen Bedingungen wie die von Beispiel 7 miteinander verbunden, wobei auch das verwendete Auftragsmaterial mit der Zusammensetzung  $Ti_3Al$  identisch ist.

In einer Ausführungsvariante mit dem Zweck, die Verformungen und die Spannungen auszugleichen, können abhängig von den besonderen Anwendungen zwei oder drei Schichten des Auftragsmaterials aufgebracht werden, und die festgehaltenen Zusammensetzungen sind in diesem Fall:  $TiAl$ ,  $Ti_3Al$  bzw.  $Ti$ . Die Herstellungsbedingungen für diese Auftragsmaterialien bleiben die gleichen wie die zuvor unter Bezugnahme auf die Beispiele 1, 2 und 3 beschriebenen, und können je nach den besonderen Anwendungen frei gewählt werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verbindungsverfahren können auch andere Paare von Elementen miteinander verbunden werden, ein intermetallisches und ein herkömmlich metallisches. Insbesondere wurden die folgenden heterogenen Verbindungen getestet:  $Ti_3Al$  + Titanlegierung ;



NiAl + Nickellegierung ; FeAl + Eisenlegierung ; TiNi + Titanlegierung ; TiNi + Nickellegierung.

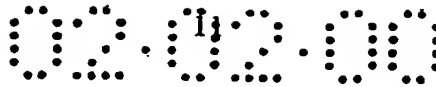
Beispiel 9: Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann in einer besonderen Anwendung die Verbindung auch darauf beschränkt werden, einer Beschichtung auf einem Teil herzustellen oder eine Reparatur eines Teils auszuführen, indem Material aufgetragen wird.

Eine Beschichtung aus TiAl oder eine Reparatur durch Auftragen von TiAl können daher unter den unter Bezugnahme auf das Beispiel 2 beschriebenen Anwendungsbedingungen durchgeführt werden, wobei in diesem Fall die Erwärmungstemperatur in der zweiten Erwärmungsstufe auf 1050 °C beschränkt ist und das Auftragmaterial in dem Verfahrensschritt c nicht zwischen zwei Elemente eingeführt, sondern einfach auf dem zu beschichtenden Werkstück oder in dem zu reparierendem Bereich des Werkstücks aufgebracht wird.

Wie oben können die Ausführungsvarianten, die zuvor unter Bezugnahme auf die Beispiele 1 und 3 für das Verbinden von Werkstücken aus TiAl beschrieben wurden, auch für die Durchführung der Beschichtung oder der Reparatur eingesetzt werden.

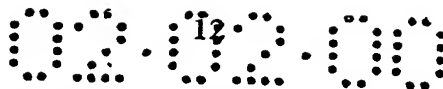
Als Beispiel 10 wird eine Beschichtung aus NiAl oder eine Reparatur durch Auftrag von NiAl unter den zuvor unter Bezugnahme auf das Beispiel 4 beschriebenen Anwendungsbedingungen durchgeführt, wobei in diesem Fall die Erwärmungstemperatur in der zweiten Erwärmungsstufe auf 1050 °C beschränkt ist und das Auftragmaterial in dem Verfahrensschritt c nicht zwischen zwei Elemente eingeführt, sondern einfach auf dem zu beschichtenden Werkstück oder in dem zu reparierendem Bereich des Werkstücks aufgebracht wird. Wie oben können die Ausführungsvarianten, die zuvor unter Bezugnahme auf die Beispiele 1 und 3 für das Verbinden von zwei Werkstücken beschrieben wurden, auch für die Durchführung der Beschichtung oder der Reparatur eingesetzt werden.

Neben den beschriebenen Beschichtungen aus TiAl und aus NiAl wurden noch weitere Beschichtungen bzw. Reparaturen auf Basis intermetallischer Werkstoffe unter den gleichen Anwendungsbedingungen wie den zuvor für den Fall von Verbindungen beschriebenen getestet und ausgeführt, insbesondere mit  $Ti_3Al$ , FeAl und TiNi.



## Ansprüche

1. Verfahren zum Verbinden von zwei Elementen, von denen mindestens eins aus einem intermetallischen Material besteht, mit den folgenden Verfahrensschritten:
  - a) Vermischen von Elementarpulvern zur Herstellung einer Gesamtzusammensetzung, die derjenigen einer intermetallischen Verbindung der gleichen Art wie das genannte intermetallische Material entspricht,
  - b) Verdichtung und Formung eines Zwischenelements aus dem in Schritt a) hergestellten Gemisch bei einer niedrigeren Temperatur als der Reaktionssinterungstemperatur der Verbindung,
  - c) Anordnen dieses Zwischenelements zwischen den Oberflächen der zu verbindenden Elemente,
  - d) Bearbeitung der in Schritt c) hergestellten Gesamtanordnung im Ofen in einem ersten Wärmebehandlungszyklus, dessen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Druck und Zeitdauer dergestalt bestimmt sind, daß eine Reaktionssinterung des Zwischenelements und eine Verfestigung der Verbindung erzielt wird,
  - e) Diffusionsbehandlung im Ofen in einem zweiten Wärmebehandlungszyklus bei einer höheren Temperatur als in Schritt d) und unter Bedingungen, die so festgelegt wurden, daß die Verbindung mechanisch verfestigt wird.
2. Verbindungsverfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt a) nach Abwiegen der Elementarpulver das Vermischen in einem Verwirbler erfolgt, und in Schritt b) die Verdichtung durch Zusammenpressen des Gemischs in einer Achsrichtung durchgeführt wird, so daß Platten von 2 mm Dicke entstehen, was zwischen 0,5 und 5 mm liegt.
3. Verbindungsverfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt a) nach Abwiegen der Elementarpulver das Vermischen in einem Verwirbler erfolgt, und in Schritt b) das Pulvergemisch in einer Latexhülle einem isostatischen Pressen dergestalt unterzogen wird, daß ein Pulverpreßbarren erzielt wird, sodann ein Einhüllen des Preßlings in Aluminium mit einer Dicke von 10 mm erfolgt und daraufhin ein Strangpressen bei 350 °C, gefolgt von einem Walzen bei 350 °C, so



daß eine Materialdicke von 0,1 bis 5 mm erzielt wird, und schließlich die Aluminiumhülle durch Scherschneiden entfernt wird.

4. Verbindungsverfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt a) nach Abwiegen der Elementarpulver das Vermischen in einem Verwirbler erfolgt, und in Schritt b) das Pulvergemisch in einer Latexhülle einem isostatischen Pressen dergestalt unterzogen wird, daß ein Preßbarren erzielt wird, sodann ein Walzen bei 20 °C erfolgt, so daß eine intermetallische Dicke von 0,1 bis 5 mm erzielt wird.
5. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei in Schritt e) die Bearbeitungstemperatur höher ist als  $0,8 T_g$  wobei  $T_g$  der absolute Schmelzpunkt der genannten intermetallischen Verbindung ist.
6. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei in Schritt c) die zu verbindenden Elemente durch Bearbeitung und eine darauf folgende Reinigung vorbereitet werden, sodann das Zwischenelement aus Zusatzstoff zwischen die beiden zu verbindenden Elemente eingefügt wird und das Ganze in einer Umhüllung aus weichem Stahl angeordnet wird, wobei ein sehr geringes Spiel gelassen wird, das weniger als 0,5 % beträgt, sodann in der Umhüllung ein Vakuum hergestellt wird und ein dichter Verschluß hergestellt wird, und in Schritt d) die Reaktionssinterung im Ofen bei 600 °C eine Stunde lang drucklos durchgeführt wird, und in Schritt e) die Diffusionsbehandlung bei 1200 °C drei Stunden lang drucklos durchgeführt wird, wonach das Ganze dann enthüllt wird.
7. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei in Schritt c) die zu verbindenden Elemente durch Bearbeitung und eine darauf folgende Reinigung vorbereitet werden, sodann das Zwischenelement aus Zusatzstoff zwischen die beiden zu verbindenden Elemente eingefügt wird und das Ganze in einer Umhüllung aus Titan angeordnet wird, in der ein Vakuum hergestellt wird und dann ein dichter Verschluß hergestellt wird, und in Schritt d) die Reaktionssinterung im Ofen bei 600 °C eine Stunde lang bei einem Druck von 50 bis 150 Mpa durchgeführt wird, und in Schritt e) die Diffusionsbehandlung bei 1200 °C drei Stunden lang bei einem Druck von 100 bis 200 Mpa durchgeführt wird, wonach das Ganze dann enthüllt wird.

8. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei in Schritt c) die zu verbindenden Elemente durch Bearbeitung und eine darauf folgende Reinigung vorbereitet werden, sodann das Zwischenelement aus Zusatzstoff zwischen die beiden zu verbindenden Elemente eingefügt wird und das Ganze in einem Werkzeug zum Warmpressen in einer Achsrichtung angeordnet wird, sodann die Schritte d) und e) in einer einzigen Reaktionssinterungs- und Diffusionsbehandlung vereint werden, die in einem Ofen zum Warmpressen in einer Achsrichtung bei einer Temperatur von 1000 °C zwei Stunden lang bei einem Druck von 50 bis 150 Mpa durchgeführt wird.
9. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die beiden zu verbindenden Elemente Werkstücke aus TiAl sind und in Schritt a) die Elementarpulver nach dem Abwiegen in folgenden Verhältnissen gemischt werden: 631 g Titan, 341 g Aluminium und 27,4 g Chrom.
10. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die beiden zu verbindenden Elemente Werkstücke aus NiAl sind und in Schritt a) die Elementarpulver nach dem Abwiegen in folgenden Verhältnissen gemischt werden: 685 g Nickel, 314 g Aluminium.
11. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die beiden zu verbindenden Elemente Werkstücke aus TiNi sind und in Schritt a) die Elementarpulver nach dem Abwiegen in folgenden Verhältnissen gemischt werden: 551 g Nickel und 449 g Titan, wobei die Temperatur der Reaktionssinterung bei dieser Verbindung auf 900 °C geändert wird.
12. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die beiden zu verbindenden Elemente Werkstücke aus FeAl sind und in Schritt a) die Elementarpulver nach dem Abwiegen in folgenden Verhältnissen gemischt werden: 674 g Eisen und 326 g Aluminium, wobei die Temperatur der Diffusionsbehandlung bei dieser Verbindung auf 1100 °C geändert wird.
13. Verbindungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die beiden zu verbindenden Elemente Werkstücke aus Ti<sub>3</sub>Al sind und in Schritt a) die Elementarpulver nach dem Abwiegen in folgenden Verhältnissen gemischt werden: 842 g Titan und 158 g Aluminium, wobei die Temperatur der Diffusionsbehandlung bei dieser Verbindung auf 1000 °C geändert wird.

14. Verbindungsverfahren nach Anspruch 13, wobei die beiden zu verbindenden Elemente ein Werkstück aus TiAl und ein Werkstück aus einer Titanlegierung wie z. B. TA6V sind.
15. Verbindungsverfahren nach Anspruch 14, wobei das Zwischenelement, das zwischen den Oberflächen der beiden zu verbindenden Elemente eingefügt wird, aus drei übereinanderliegenden Schichten von Zusatzmaterial mit der Zusammensetzung TiAl, Ti<sub>3</sub>Al bzw. Ti besteht.
16. Verbindungsverfahren nach Anspruch 14, wobei das Zwischenelement, das zwischen den Oberflächen der beiden zu verbindenden Elemente eingefügt wird, aus zwei übereinanderliegenden Schichten von Zusatzmaterial besteht, dessen Zusammensetzung jeweils aus der Gruppe TiAl, Ti<sub>3</sub>Al und Ti gewählt ist.
17. Verfahren zur Herstellung einer Beschichtung, die aus einem intermetallischen Material aus der Gruppe TiAl, NiAl, Ti<sub>3</sub>Al, FeAl, TiNi besteht, auf einem Werkstück, bestehend aus den Verfahrensschritten, die in einer beliebigen der Ansprüche 1 bis 8 definiert sind, wobei in Schritt c) das Zusatzmaterial auf das zu beschichtende Werkstück aufgebracht wird.
18. Verfahren zur Ausführung einer Reparatur durch Hinzufügen eines intermetallischen Materials aus der Gruppe TiAl, NiAl, Ti<sub>3</sub>Al, FeAl, TiNi auf ein Werkstück, bestehend aus den Verfahrensschritten, die in einer beliebigen der Ansprüche 1 bis 8 definiert sind, wobei in Schritt c) das Zusatzmaterial in dem zu reparierendem Werkstückbereich aufgebracht wird.